

고조파 제거를 통한 IPMSM의 센서리스 제어에서의 위치추정 성능 개선

안민혁\*,유지윤\*,이광운\*\*  
고려대학교\*, 목포해양대학교\*\*

Position estimation improvement of IPMSM Sensorless Control by Suppression of Harmonics

Min-Hyuk An\*, Ji-Yoon Yoo\*, Kwang-Woon Lee\*\*  
Korea University\*, Mokpo National Maritime University\*\*

**Abstract** - 밴드패스필터를 사용하여 센서리스 벡터제어에 영향을 주는 6차고조파 성분을 제거하여 안정적인 제어를 제안하였다.

비정현적인 역기전력을 가진 IPMSM모터의 센서리스 벡터 제어에서 유기전압에 고조파가 포함되는 경우에 그 영향이 추정연산에 나타나게 된다. 삼상 모델에 나타나는 5차, 7차 고조파의 경우는 d,q축 모델로 변환 시 6차 고조파 성분으로 나타나게 된다. 이 6차 고조파 성분은 위치 추정과 속도추정에 영향을 주어서 토크 맥동을 발생시킨다. 본 논문에서는 이러한 6차 고조파의 영향으로 추정연산에 미치는 영향들을 알아보고, 이 영향을 고조파 제거를 위한 복잡한 계산을 하지 않으면서 간단한 밴드패스필터를 통해 고조파가 위치추정에 미치는 영향을 최대한 줄이는 방법을 제시하였다.

1. 서 론

최근, IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)이 빠른 반응과 정확한 콘트롤을 필요로 하는 산업용이나 가전제품들에 폭넓게 사용되고 있다. IPMSM은 돌극성을 가지고 있어서 이를 이용한 릴럭턴스 토크를 사용할 수 있어서 더 좋은 효율을 얻을 수 있다. IPMSM을 콘트롤 하기 위해서는 모터의 스테이터 전류를 콘트롤 해야 하는데 이 때 로터의 위치 정보를 알아야 되기 때문에 엔코더나 리졸버가 필요하다. 하지만 이런 위치 센서들은 가격이 비싸고 추가적인 공간이 필요하기 때문에 센서가 필요 없는 센서리스 운전의 필요성이 커지고 있다.

IPMSM의 센서리스 운전 방법 중 IPMSM의 전압, 전류 모델을 이용하여 역기전력으로부터 위치와 속도를 추정하는 방법은 역기전력에 고조파를 포함하지 않아야 한다. 하지만 실제로는 모터의 구조적인 불완정성같은 여러 가지 원인 때문에 IPMSM에는 다양한 고조파 성분이 포함되어 있다. 이런 고조파 성분은 센서리스 운전에서 위치와 속도를 추정하는데 안 좋은 영향을 미친다.

이런 고조파의 영향을 줄이기 위하여 반복제어나 퓨리어 트랜스포름을 이용한 방법 등 다양한 해법이 제시되었다. (1)

하지만 본 논문에서는 간단한 밴드패스필터만을 사용하여 고조파를 줄임으로써 센서리스 운전에서 성능을 개선시키는 방법을 제안하였다. 그리고 실험을 통해 얻어진 결과로 제안된 방법의 타당성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 모터 모델과 센서리스 운전 모델

일반적으로 IPMSM모터의 전압방정식을 d,q축으로 나타낸 식은

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix}$$

(1)

가 되고  $\omega$ 는 전기각속도,  $i_d, i_q$ 는 d,q축 전기자 전류를 나타내며,  $v_d, v_q$ 는 d,q축 터미널 전압을,  $R_a$ 는 전기자 권선 전압을,  $L_d, L_q$ 는 d,q축 인덕턴스를,  $\psi_a$ 는 쇄교자속을 각각 나타낸다.

센서리스 운전은 MATSUI교수가 제안한 역기전력을 이용하여 위치와 속도를 추정하는 방법을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix}$$

(2)

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(n) - i(n-1)}{T}$$

(3)

식 (2)에서 가상의 축  $\gamma, \delta$ 의 전압 근사 방정식을 나타내었다. 이 식을, di/dt를 오일러 근사식을 이용하여 sampling점 n과 n-1, 그리고 샘플링 시간 T의 방정식으로 만든 식 (3)과 정리하면 샘플점 n에서의 실제 운전상황에 대한 차분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{L_d} T & \omega_M \frac{L_q}{L_d} T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q} T & 1 - \frac{R_s}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_d \nu_\gamma(n-1) \\ L_d \nu_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} e \begin{bmatrix} L_q \sin\Delta\theta \\ -L_d \cos\Delta\theta \end{bmatrix}$$

(4)

여기서  $e = K_E \omega$ 이다.

그리고 이상적인 상황을 가정한 모델로 한 방정식은 실제 d,q축과  $\gamma, \delta$ 의 축이 일치하는 상태, 즉  $\Delta\theta$ 가 0이 되고  $e = e_M = K_E \omega_M$ 로 놓으면 식 (5)가 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{L_d} T & \omega_M \frac{L_q}{L_d} T \\ -\omega_M \frac{L_d}{L_q} T & 1 - \frac{R_s}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_d \nu_\gamma(n-1) \\ L_d \nu_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_d L_q} e_M \begin{bmatrix} 0 \\ -L_d \end{bmatrix}$$

(5)

식 (4)의 전류값은 전류센서를 통하여 직접 값을 구할

수 있고, 식 (5)의 값은 한 샘플주기 전의 전압, 전류 측정값으로 계산을 통하여 구할 수 있게 되므로, 전류의 실제 값과 가상의 축을 이용한 모터모델의 값을 이용하여 그 차분을 구할 수 있다. 그 값은

$$\begin{bmatrix} \Delta i_\gamma(n) \\ \Delta i_\delta(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta \theta \\ L_d (e_M - e \cos \Delta \theta) \end{bmatrix} \doteq \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta \theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \quad (6)$$

이 된다. 여기서  $\gamma$ 축 전류 차이는 위치 오차와,  $\delta$ 축 전류차이는 역기전력의 오차, 즉 속도오차와 비례하는 것을 확인할 수 있다. 식 (6)을 이용하여 다음과 같은 위치 및 속도 추정 알고리즘을 나타낼 수 있다. [2][3][4]

$$\begin{aligned} e_M &= e_M(n-1) - K_e \Delta i_\delta(n) \\ \theta_M(n) &= \theta_M(n-1) + \frac{T}{K_E} e_M(n) + K_\theta sgn \omega_{M0}(n-1) \Delta i_\gamma(n) \\ sgn \omega_{M0}(n-1) &= \begin{cases} 1 : \omega_{M0}(n-1) \geq 0 \\ -1 : \omega_{M0}(n-1) < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.1.1 역기전력에서 나타나는 고조파의 영향

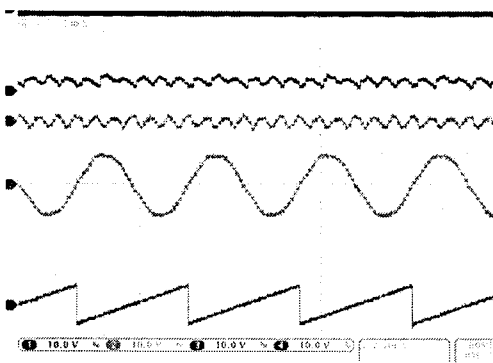
IPMSM의 역기전력에는 5,7차 고조파가 주로 포함되는데 센서리스 제어 모델에서 위치와 속도 오차에는 6차 고조파가 포함되어 있다. 이것은 5,7차 고조파가 3상/2상 변환을 거쳐서 d,q축으로 나타내면 식 (8)과 같이

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ e \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} K_{hd}(\theta) \\ K_{hq}(\theta) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \\ &+ \sqrt{\frac{3}{2}} \omega \begin{bmatrix} (-5\psi_{c5} - 7\psi_{c7})\sin 6\theta + (5\psi_{s5} + 7\psi_{s7})\cos 6\theta \\ (-5\psi_{s5} + 7\psi_{s7})\sin 6\theta + (-5\psi_{c5} + 7\psi_{c7})\cos 6\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

6차 성분으로 나타낼 수 있게 되는 것을 보여준다. 이러한 고조파 성분은 그 영향이 추정연산에 나타나게 되어서 발생시킨다.

식 (6)에서  $\gamma$ 축 전류 차이는 위치오차와 비례 한다는 것을 확인할 수 있었고, 이 차이가 작고 안정할수록 위치추정의 정확도를 높일 수 있다 따라서, 이 값에서의 고조파를 제거함으로써 제어의 안정성을 확보할 수 있다.

그림 (1)에 한 주기에 6번씩 나타나는  $\gamma$ 축 전류의 고조파를 확인할 수 있다.



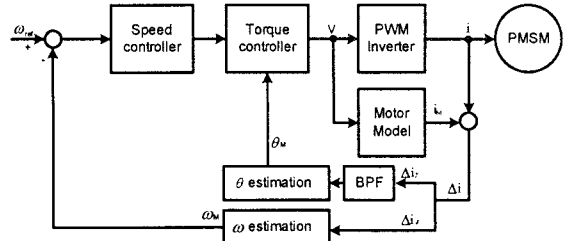
<그림 1>  $\gamma$ 축 전류의 6고조파

### 2.2 고조파 제거를 위한 시스템 구성

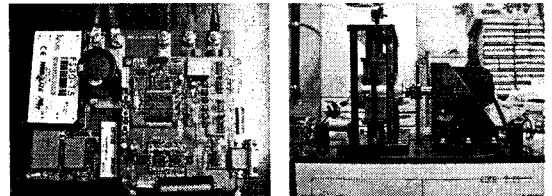
본 단락에서는 고조파로 인한 추정오차의 발생을 억제하기 위하여 밴드패스필터(BPF)를 이용한 고조파를 제거하는 방법을 제안하였다. 그림 (2)에 전체 시스템을 나

타내었다. Matsui Method의 기본적인 구성도에 고조파 제거를 위한 BPF를 추가시킨 구성을 나타내었다.

그림 (3)에서 DSP 제어보드는 TMS320F28335를 사용하였으며, 인버터는 2kW급이고, IPMSM은 Fairchild 사의 FSBB30CH60을 사용하였다. 부하는 저항부하를 사용하였으며, 대상전동기는 IPMSM이며 사양은 표 (1)과 같다.



<그림 2> 전체 시스템 구성도



<그림 3> 전체 시스템의 사진

<표 1> 전동기 사양

정격 용량	5[kW]
상 저항( $R_s$ )	0.21[ $\Omega$ ]
d축 인덕턴스( $L_d$ )	15[mH]
q축 인덕턴스( $L_q$ )	31[mH]
역기전력 상수( $K_E$ )	0.0643[V/(rad/s)]
극수	6 극
정격속도	6000[rpm]

본 논문에서는  $\gamma$ 축 전류의 6고조파를 구동 속도에 관계없이 제거하기 위해 전기각속도의 6배의 주파수로 밴드패스 필터를 구성하였다. 고조파를 가진  $\gamma$ 축 전류로부터 밴드패스필터를 거친, 고조파의 성분만을 빼는 방법을 통해 고조파를 상당히 제거한  $\gamma$ 축 전류를 얻을 수 있다.

### 2.3 실험 결과

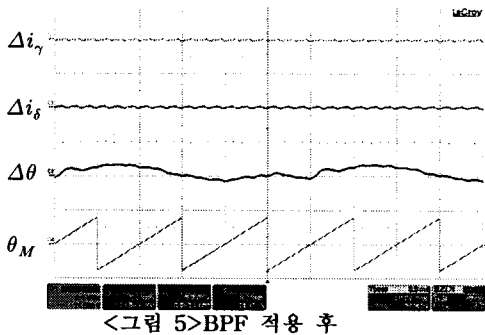
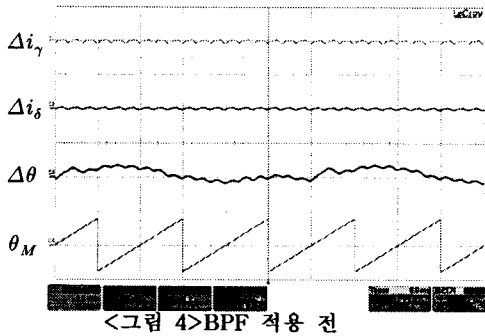
위에서 제안된 알고리즘에 의해 고조파를 제거하였을 때,  $\gamma$ 축 전류 차이와  $\delta$ 축 전류 차이를 나타내었다. 그리고 엔코더를 이용하여 측정된 실제 위치와 추정을 통하여 얻은 위치의 차이를 나타내는 각도 오차( $\Delta \theta$ )와 추정 각도( $\theta_M$ )를 각각 나타내고 있다.

제안한 방법을 사용하여 실험을 진행한 결과를 그림 (5)에 나타내었다. 그림 (4)에서,  $\gamma$ 축 전류 차이에 나타나는 6고조파의 영향이 위치를 추정하는 계산에 들어가게 되어, 추정위치와 실제위치의 차이 값에도 그대로 나타남을 확인할 수 있다. 실제 위치 값을 엔코더를 이용하여 구하였기 때문에 이 값에는 고조파가 포함되어 있지 않다.

그림 (5)에서 밴드 패스 필터를 거친  $\gamma$ 축 전류 차이의 고조파 영향이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있고 이와 비례하는 위치 오차의 값에서도 고조파 영향이 줄어들어서, 실제 위치와 추정 위치의 차이 값에 고조파의 영향이 줄어든 것이 확인한다.

따라서 본 논문에서 제안한 밴드패스 필터를 이용한 고

조파의 영향을 줄이는 방법의 타당성을 확인할 수 있고, 고조파의 영향을 줄임으로써 위치 추정에서 더욱 정확한 값을 얻어서 안정적인 센서리스 제어가 이루어짐을 검증하였다.



### 3. 결 론

본 논문은 비정현적인 역기전력을 가진 IPMSM의 센서리스 제어에서 밴드패스 필터를 사용하여 고조파의 영향을 줄이는 개선된 알고리즘을 구현하였다. IPMSM의 센서리스 제어에서 고조파의 영향을 줄이는 방법은 여러 가지가 제안 되었지만, 본 논문에서는 적절한 위치에 간단한 밴드패스 필터만을 사용하여 고조파의 영향을 줄여 센서리스 운전에서 안정성을 높일 수 있는 방법을 제시하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] J.S. Kim, S. Doki and M. Ishida, "Improvement of IPMSM Sensorless Control Performance by Suppression of Harmonics on the Vector Control Using Fourier Transform and Repetitive Control", IEEE Trans, industrial Electronics, vol.5-8, pp. 597-602, 2002
- [2] N. Matsui, M. Shigyo, "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensor", IEEE Trans, Industry Applications, vol.28, No.1, pp. 120, 1992
- [3] R. Mizutani, T. Takeshita, N. Matsui, "Current Model-Based Sensorless Drives of Salient-Pole PMSM at Low Speed and Standstill" IEEE Trans, Industry Applications, vol.34, pp. 841-846, 1998
- [4] K. Ohnishi, N. Matsui, Y. Hori, "Estimation, identification, and sensorless control in motion control system", IEEE Trans, vol.82, pp. 1253-1265, 1994